

**ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ СНИЖЕНИЯ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ  
В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ НАПРЯЖЕНИЕМ 220 КВ  
INNOVATIVE TECHNOLOGIES FOR REDUCING LOSSES IN 220 KV NETWORKS**

**Аннотация:** В статье рассмотрены инновационные технологии, направленные на повышение эффективности работы электрических сетей 220 кВ путем снижения потерь электроэнергии. Показана целесообразность их применения для минимизации потерь электроэнергии.

**Abstract:** The article discusses innovative technologies aimed at increasing the efficiency of 220 kV electrical networks by reducing electricity losses. The feasibility of their use to minimize electricity losses is shown.

**Ключевые слова:** эффективность, надежность, компенсирующее устройство, провода, потери.

**Keywords:** efficiency, reliability, compensating device, wires, losses.

Эффективность работы электрических сетей определяется в значительной степени уровнем потерь электроэнергии. В электрических сетях они возникают при транспорте и распределении электроэнергии. В развитых странах относительные потери электроэнергии составляют порядка 4-5 %. Предельными являются потери на уровне 10% [4]. По данным компании «Россети» относительные потери электроэнергии за 2021 год составили 7,34%, что выше уровня потерь в развитых странах и не соответствует оптимальным условиям эксплуатации. Высокий уровень потерь в сетях напряжением 220 кВ снижает пропускную способность линий электропередачи, увеличивает коэффициент загрузки силовых трансформаторов и оборудования, что приводит к ухудшению статической устойчивости электроэнергетической системы и системной надежности. Высокий уровень потерь приводит к повышенным эксплуатационным затратам и влияет на прибыль электросетевых комплексов. Поэтому потери электрической энергии следует минимизировать.

Целью данной работы является обоснованный выбор инновационных технологий для минимизации технологических потерь электроэнергии в сетях напряжением 220 кВ и оценка их эффективности.

Для реализации поставленной цели решены следующие задачи:

1. Выбор и обоснование целесообразности применения инновационных технологий для снижения потерь электроэнергии;
2. Характеристика выбранных инновационных технологий;
3. Оценка эффективности снижения потерь электроэнергии при применении инновационных технологий.

Рассмотрим структуру технологических потерь электроэнергии, характерную для сетей 220 кВ. Она состоит из метрологических и технических потерь электрической энергии. Метрологические потери связаны с погрешностью измерения приборов учета электроэнергии, измерительных трансформаторов, устройств сбора и передачи данных (УСПД). Наиболее значимые технические потери состоят из нагрузочных потерь в силовых трансформаторах и автотрансформаторах, кабельных и воздушных линиях, которые зависят от потребляемой мощности, и условно – постоянных, включающих расход на собственные нужды подстанций, потери холостого хода в стали силовых трансформаторов или



автотрансформаторов, а также потери электроэнергии на корону [8]. Снижая эти составляющие потерь электроэнергии, можно решить рассмотренные выше проблемы. Наиболее значимый эффект может быть достигнут применением инновационных технологий в сетях 220 кВ.

Нагрузочные потери электроэнергии в оборудовании подстанций и линиях электропередачи можно снизить с помощью устройств FACTS 2 поколения и проводов нового поколения (ПНП). Условно – постоянные потери на собственные нужды можно компенсировать с помощью возобновляемых источников энергии, подключенных к подстанциям. Их возможные варианты определяются климатическими условиями места расположения подстанции. Это могут быть солнечные панели, ветровые установки, гибридные электрические станции в сочетании с системами накопления электроэнергии. Они также обеспечат дополнительный резерв мощности в сети на случай аварийного отключения подстанции от сети для бесперебойного электроснабжения потребителей первой и второй категории по надежности. Потери электроэнергии, возникающие при коронировании проводов, могут быть снижены за счет замены традиционных проводов на провода нового поколения. Условно – постоянные потери холостого хода минимизируются при помощи устройств FACTS 2 поколения. Метрологические потери снижаются при переходе на интеллектуальную систему учета электроэнергии или при замене традиционных измерительных трансформаторов на цифровые или оптические измерительные трансформаторы.

На рисунке 1 показано соответствие выбранных инновационных технологий структуре потерь электроэнергии в электрической сети 220 кВ.

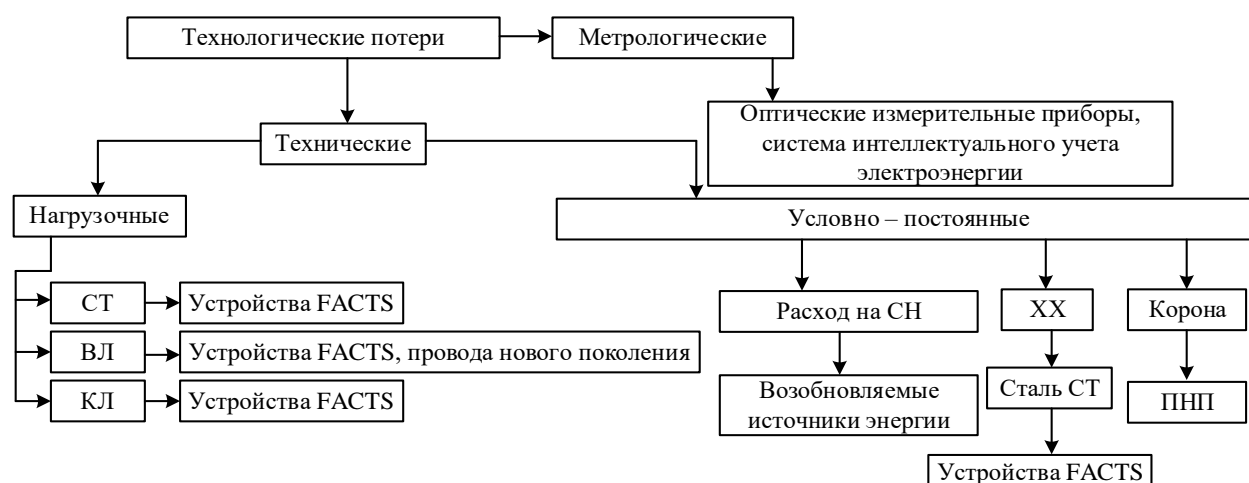


Рис. 1 – Выбор инновационных технологий для снижения структурных составляющих технологических потерь электроэнергии

Из устройств FACTS 2 поколения для снижения потерь электроэнергии целесообразно использовать устройства регулирования напряжения и потоков реактивной мощности, подключаемые к сетям параллельно, такие как статический синхронный компенсатор (СТАТКОМ), синхронный статический продольный компенсатор (ССПК), асинхронизированный синхронный компенсатор (АСК) и другие. Их выбор обоснован как генерацией, так и потреблением реактивной мощности в диапазоне от -100% до + 100% установленной мощности устройства, что соответствует всем возможным установившимся режимам в сети, включая утяжеленные, послеаварийные и ремонтные.

Статический синхронный компенсатор – синхронный источник реактивной мощности, за счет которого поддерживается заданный уровень напряжения и поток реактивной мощности, протекающей по сети, а также обеспечивается качество электроэнергии. СТАТКОМ состоит из преобразователя напряжения с емкостным накопителем на стороне постоянного тока, трансформатора связи и системы управления.



Управляется данное устройство с помощью биполярных транзисторов с изолированным затвором. Принцип действия данного устройства основан на изменении напряжения вентильной обмотки. Если напряжение сетевой обмотки больше напряжения вентильной, то СТАТКОМ потребляет реактивную мощность и работает в режиме выпрямителя, если меньше – отдает реактивную мощность и работает в режиме инвертора [9, 11].

За счет компенсации реактивной мощности в сети они снижают нагрузочные потери в линиях и оборудовании подстанций. Поддержание заданного напряжения обеспечивает снижение условно-постоянных потерь.

Покажем на простейшем примере, как эти устройства влияют на нагрузочные потери электроэнергии в линиях, силовых трансформаторах и условно-постоянные потери.

Нагрузочные потери в линиях и двухобмоточных трансформаторах рассчитываются по формуле:

$$\Delta P_{л} = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} \cdot R. \quad (1)$$

Например, при передаче активной мощности, равной 60 МВт, и реактивной, равной - 30 Мвар, по проводу марки АС – 240/56 длиной 100 км и напряжении в узле сети 250 кВ потери активной мощности до установки устройств FACTS составят:

$$\Delta P_{л} = \frac{60^2 + (-30)^2}{250^2} \cdot 12,18 = 0,877 \text{ МВт.}$$

Так как рассмотренные устройства могут компенсировать реактивную мощность до 0, то потери в этом случае составят:

$$\Delta P_{л} = \frac{60^2}{250^2} \cdot 12,18 = 0,702 \text{ МВт.}$$

Нагрузочные потери в линии после установки устройств FACTS снизились на 20% (0,17 МВт). Рассчитаем снижение потерь электроэнергии в рублях за год:

$$I_w = \Delta W \cdot C \cdot t, \quad (2)$$

где  $\Delta W$  – снижение потерь электроэнергии за рассматриваемый период  $t$ ;

$C$  – стоимость потерь электроэнергии, равная 0,5 руб./кВт·ч [12].

$$I_w = 175 \cdot 0,5 \cdot 8760 = 766500 \text{ руб.}$$

Определим нагрузочные потери в силовых трансформаторах, например, марки ТРДЦН – 63000/220 до установки устройств FACTS.

$$\Delta P_{т} = \frac{1}{2} \cdot \frac{60^2 + (-30)^2}{250^2} \cdot 3,9 = 0,14 \text{ МВт.}$$

Потери после установки устройств FACTS составят:

$$\Delta P_{т} = \frac{1}{2} \cdot \frac{60^2}{250^2} \cdot 3,9 = 0,112 \text{ МВт.}$$

Потери снизились на 20% (0,028 МВт).

В денежном эквиваленте эффект от снижения потерь составит:

$$I_w = 28 \cdot 0,5 \cdot 8760 = 122640 \text{ руб.}$$

Потери холостого рассчитываются по формуле:

$$\Delta P_{x.x.} = \left( \frac{U}{U_{ном}} \right)^2 \cdot P_{x.x.}. \quad (3)$$

Например, потери холостого хода трансформаторов ТРДЦН – 63000/220 при напряжении в линии до регулирования составляют:

$$\Delta P_{x.x.} = \left( \frac{250}{220} \right)^2 \cdot 82 \cdot 2 = 211,777 \text{ кВт.}$$

При поддержании напряжения на уровне 220 кВ с помощью устройства FACTS потери составят:

$$\Delta P_{x.x.} = \left( \frac{220}{220} \right)^2 \cdot 82 \cdot 2 = 164 \text{ кВт.}$$



Потери снизились на 22,56% (47,777 кВт).

В денежном эквиваленте эффект от снижения потерь составит:

$$I_w = 47,777 \cdot 0,5 \cdot 8760 = 209263,26 \text{ руб.}$$

Из проводов нового поколения для снижения потерь электроэнергии целесообразно принять высокотемпературные провода (ВТП). Они состоят из стальной жилы и термостойкого алюминиевого сплава поверх жилы. Преимущество этих проводов заключается в том, что они способны выдерживать длительно допустимую температуру от 150 до 210 °С в зависимости от марки и имеют меньшее электрическое сопротивление. Соответственно замена перегруженных проводов на провода нового поколения, а именно ВТП, позволит снизить нагрузочные потери в линиях, условно – постоянные потери на коронный разряд и повысить пропускную способность.

Сравним потери в проводах марки АС – 240/56, сопротивление которого равно 12,18 [13], и АСВТ – 258/73, сопротивление которого равно 11,32 [10]. Потери в линии, выполненной проводами марки АС – 240/56, равны:

$$\Delta P_{л} = \frac{60^2 + (-30)^2}{250^2} \cdot 12,18 = 0,877 \text{ МВт.}$$

Потери в линии, выполненной проводами марки АСВТ – 258/73, равны:

$$\Delta P_{л} = \frac{60^2 + (-30)^2}{250^2} \cdot 11,32 = 0,815 \text{ МВт.}$$

Потери снизились на 7% (0,062 МВт).

В денежном эквиваленте эффект от снижения потерь составит:

$$I_w = 62 \cdot 0,5 \cdot 8760 = 271560 \text{ руб.}$$

Нагрузочные потери в линиях при компенсации реактивной мощности до 0 и использования провода АСВТ – 258/73 составят:

$$\Delta P_{л} = \frac{60^2}{250^2} \cdot 11,32 = 0,652 \text{ МВт.}$$

Потери снизились на 25,66% (0,225 МВт).

Следовательно, суммарно нагрузочные потери в линиях и трансформаторах при компенсации реактивной мощности до 0 с помощью устройств FACTS 2 поколения и использования провода АСВТ – 258/73 снизятся на 24,88% (0,253 МВт·ч).

В денежном эквиваленте эффект от снижения потерь составит:

$$I_w = 0,253 \cdot 0,5 \cdot 8760 = 1108140 \text{ руб.}$$

Для провода АС – 240/39 длиной 100 км потери на корону составят:

$$\Delta P_{к} = 3,85 \cdot 100 = 0,385 \text{ МВт.}$$

Если провод АС – 240/56 заменить на ПНП АСк2у – 240/39, для которого удельные потери на корону равны 2,1 кВт/км [2], то для линии:

$$\Delta P_{к} = 2,1 \cdot 100 = 0,21 \text{ МВт.}$$

Потери снизились на 45,45% (0,175 МВт).

В денежном эквиваленте эффект от снижения потерь составит:

$$I_w = 175 \cdot 0,5 \cdot 8760 = 766500 \text{ руб.}$$

Так как сопротивление провода АСк2у составляет 0,121 Ом/км [11] (то есть, как и у АС – 240), то нагрузочные потери будут такими же.

Собственные нужды подстанции – это совокупность вспомогательных устройств и относящейся к ним электрической части, обеспечивающих работу подстанции. Их можно возместить путем сооружения и подключения к подстанции нетрадиционных источников энергии (солнечная и ветряная электростанции или гибридная). Рассмотрим гибридную электростанцию, а именно солнечно – ветровую. Она состоит из солнечных панелей, ветрогенераторов, контроллеров заряда аккумуляторов, инверторов и повышающего трансформатора. Схема подключения приведена на рисунке 2. При соответствующих условиях погоды и климата электроэнергия будет поступать от ветрогенератора и/или



солнечных панелей, далее преобразовываться в переменную через инвертор, после чего будет идти к трансформатору собственных нужд. В темное время суток и отсутствия ветра потребители собственных нужд могут получать электроэнергию от накопителей или из системы. В случае разрядки аккумуляторов необходимо будет включать трансформатор собственных нужд и получать электроэнергию от внешней сети. Для наилучшей эффективности аккумуляторы рекомендуется соединять параллельно – последовательно.

При значительном изменении мощности инвертор будет работать со значительной нагрузкой. Поэтому рекомендуется установка 2 инверторов [1].

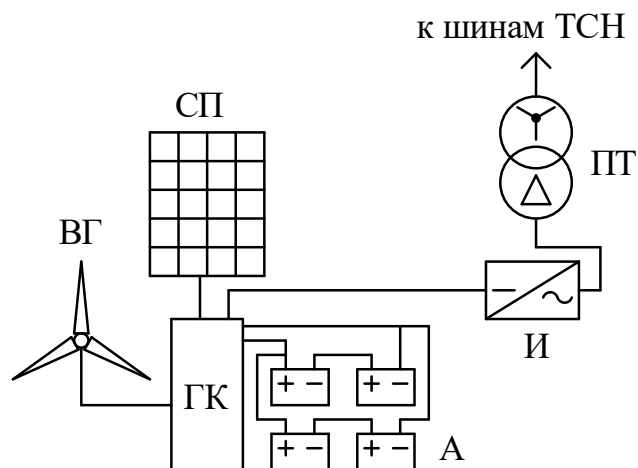


Рис. 2 – Схема подключения гибридной электростанции к электрической сети

На схеме приняты следующие сокращения: ВГ – ветрогенератор, СП – солнечная панель, ГК – гибридный контроллер, А – аккумуляторы, И – инвертор, ПТ – повышающий трансформатор, ТСН – трансформатор собственных нужд.

В классических трансформаторах тока есть не только основная погрешность, но и дополнительная, которая возникает из-за гармоник, не оптимальной загрузки вторичных цепей, их взаимного влияния и температуры. В оптических трансформаторах эти дополнительные погрешности компенсируются, то есть эти погрешности устраняются так, чтобы сами трансформаторы во всем рабочем диапазоне влияющих факторов находились в заданном классе точности. Трансформаторы состоят из внешней части, в которой чувствительный оптический элемент крепится к изоляционной опорной колонне с соединительным оптическим кабелем, и внутренней, состоящей из электроники.

Для обеспечения точности измерений в соответствии с требованиями класса точности измерений 0,2s (расширенный диапазон в области малых погрешностей) в приборах применен метод цифровой компенсации температурной погрешности при малых значениях токов. С этой целью программой для расчета тока учитывается температурная зависимость чувствительности. Сигнальный процессор каждую секунду в онлайн-режиме считывает сигнал, пропорциональный температуре, измеренной оптоволоконным термометром, который расположен рядом с основным чувствительным волокном. На основе считанных сигналов процессор вычисляет значение силы тока в шине с учетом влияния температуры на чувствительный элемент. Надежность вышеописанной компенсации обусловлена тем, что температурная зависимость чувствительности носит фундаментальный физический характер и не может изменяться с течением времени. Для долговременной работы оптических трансформаторов и контроля состояния волоконного датчика тока имеет большое значение встроенная в прибор система онлайн-диагностики, обеспечиваемой наличием специального диагностического порта, который может работать в режиме удаленной диагностики, или путем формирования общего статуса работоспособности по стандарту МЭК 61850-8-1 [6].

Рассчитаем метрологические потери для традиционного трансформатора тока и трансформатора напряжения с классом точности 0,5:





$$\Delta W_{\text{погр}} = 0,01 \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n \delta_i^2 \cdot W_i^2 + \sum_{j=1}^n \delta_j^2 \cdot W_j^2}, \quad (4)$$

где  $\delta_i(\delta_j)$  – погрешность измерительного канала принятой (отданной) активной электроэнергии;

$W_i(W_j)$  – прием (отдача) электроэнергии, зафиксированной измерительными каналами активной электроэнергии.

$$\Delta W_{\text{погр}} = 0,01 \cdot \sqrt{30000^2 \cdot 1,5^2 + 30000^2 \cdot 1,5^2} = 636,396 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

Для оптических трансформаторов тока и напряжения с классом точности 0,2s потери составят:

$$\Delta W_{\text{погр}} = 0,01 \cdot \sqrt{30000^2 \cdot 0,75^2 + 30000^2 \cdot 0,75^2} = 318,198 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

Метрологическая составляющая потерь электроэнергии снизилась на 50% (318,198 кВт·ч).

В денежном эквиваленте эффект от снижения потерь составит:

$$I_w = 318,198 \cdot 0,5 \cdot 8760 = 1393707 \text{ руб.}$$

При применении инновационных технологий потери электроэнергии снизились суммарно:

нагрузочные на 0,253 МВт·ч (24,88%);

условно – постоянные на 0,223 МВт·ч (37,33%);

метрологические на 0,318 МВт·ч (50%).

Общая величина снижаемых потерь в рассматриваемом примере составила 0,777 (31,33%).

Полученные значения подтверждают эффективность комплексного применения инновационных технологий для снижения потерь электроэнергии.

Выводы

1. Показана структура технологических потерь электроэнергии в сетях 220 кВ.
2. Выбраны целесообразные инновационные технологии для минимизации наиболее значимых структурных составляющих потерь электроэнергии;
3. Приведена характеристика инновационных технологий с точки зрения их воздействия на структурные составляющие потерь.
4. Показано влияние выбранных инновационных технологий на уровень потерь электроэнергии.

#### Список литературы:

1 Бекиров, Э. А. Оптимизация режимов работы систем электроснабжения с использованием возобновляемых источников энергии / Э. А. Бекиров, М. М. Асанов, А. Алькаата // Строительство и техногенная безопасность – 2018. – № 13. – С. 107 – 111.

2 Вихарев, А.П. Исследование характеристик коронного разряда для компактированных проводов АЕРО-Z / А. П. Вихарев, А. В. Вильнер // Общество, наука, инновации : материалы всероссийской ежегодной научно – практической конференции (Киров, 15–16 апреля 2013) / Киров : ВятГУ, 2013. – С. 2087 – 2019.

3 Едемский, С. Н. Использование устройства компенсации реактивной мощности СТАТКОМ в электроэнергетической системе / С. Н. Едемский, И. И. Пушкаренко, О. В. Тригуб // Энергобезопасность и энергосбережение – №3. – 2013. – С. 27 – 30.

4 Железко, Ю.С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии: Руководство. / Ю. С. Железко. – М. : НЦ ЭНАС, 2009 – 456 с.

5 Киселев, Г. Ю. Потери электрической энергии в электрических сетях / Г. Ю. Киселев [и др.] // Энергетика и электротехника – № 1. – 2023. – С. 80 – 85.

6 Найденов, А. Д. Оптические трансформаторы тока / А. Д. Найденов // Вестник науки и образования – № 8. – 2020. – С. 19 – 23.

7 О гладких проводах и короне (avatok.ru).



8 Савина, Н. В. Методы расчета и анализа потерь электроэнергии в электрических сетях / Н. В. Савина. – Благовещенск : Изд-во АмГУ, 2014. – 150 с.

9 Солони́на, Н. Н. Новые технологии компенсации реактивной мощности / Н. Н. Солони́на, К. В. Суслов, З. В. Солони́на // Вестник ИрГТУ – № 5. – 2016. – С. 135 – 143.

10 СТО 56947007- 29.060.50.268-2019. Указания по проектированию ВЛ 220 кВ и выше с неизолированными проводами нового поколения.

11 Тухватуллин, М. М. Анализ современных устройств FACTS, используемых для повышения эффективности функционирования электроэнергетических систем России / М. М. Тухватуллин [и др.] // ЭСиК – № 3. – 2015. – С. 41 – 46.

12 [ФАС России | Федеральная служба по тарифам упразднена \(fas.gov.ru\)](http://fas.gov.ru)

13 Электротехнический справочник: В 4 т. Т. 3. Производство, передача и распределение электрической энергии - Под общ. ред. профессоров МЭИ В.Г. Герасимова и др. (гл. ред. А.И. Попов). – 8-е изд., испр. и доп. – М. : Издательство МЭИ, 2008. – 964 с.

